

琉球大学学術リポジトリ

縦渦による円管内伝熱促進の構造

メタデータ	言語: 出版者: 日本機械学会 公開日: 2007-03-04 キーワード (Ja): キーワード (En): Forced Convection, Heat Transfer Enhancement, Vortex Generator, Longitudinal Vortex, Flow Visualization Analogy 作成者: 瀬名波, 出, 石川, 周司, 親川, 兼勇 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/240

縦渦による円管内伝熱促進の構造*

瀬名波 出^{*1}, 石川 周司^{*2}, 親川 兼勇^{*1}Studies on Structure of Heat Transfer Enhancement in Tube
with Longitudinal Vortices Being GeneratedIzuru SENAHA^{*3}, Syuji ISHIKAWA and Kenyu OYAKAWA^{*3} Department of Mechanical Systems Engineering, University of the Ryukyus,
1 Senbaru, Nishihara-cho, Okinawa, 903 0213 Japan

As an augmentative means of forced convective heat transfer, relationships between the heat transfer and the flow behavior were experimentally investigated when the longitudinal vortex was artificially generated by single vortex generator in a pipe. The formation of vortices and then flow spiraling downstream were visualized by means of fluorescein and smoke as tracer of water and air flow, respectively. The velocity components were also measured using an inclined hot wire probe in three flow directions. The vortices rings being accompanied with longitudinal vortex as a kind of shear vortex gradually closed to the wall surface. It was found that the local heat transfer coefficients was mainly increased depending on the circumferential velocity component. Furthermore, a law of non-analogy between heat and flow was discussed about some locations taking accounts of both heat transfer coefficients and skin friction factors.

Key Words: Forced Convection, Heat Transfer Enhancement, Vortex Generator, Longitudinal Vortex, Flow Visualization, Analogy

1. 緒 言

近年,工学的に縦渦を利用する研究が活発化してきている。熱伝達促進手段として縦渦を生成させた場合,縦渦の回転により流れが壁面へ吹き下ろす場で高い熱伝達促進効果を得ることが報告されている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。また縦渦はリブ突起などにより生成されるはく離渦と比べて下流方向への持続性が高いことから熱伝達促進の有効な手段となり得る。しかしながら縦渦の生成およびそれに誘起される流れは極めて複雑な場を形成し,その構造や発達過程,乱れの増加,非定常性などの流れ特性を変化させるが,それら流れ諸特性の変化がどのように熱伝達促進に寄与するかについての検討は十分にはなされていないようである。

縦渦を用いた伝熱促進の研究の多くは,平板上および平行平板流路内の場合であり,他の流路形状への応用例は極めて少ない。最も単純な形状の一つである円管内へ縦渦を導入した例すらほとんど見当たらず,熱交換器等の装置設計に用いられる複雑な管路への応

用については皆無に近い。このことは縦渦のもつ強い三次元性および流体の混合効果の複雑さより,多種流路への応用研究は比較的困難であることを意味する。

これまで著者らは伝熱促進を目的とし縦渦を利用した応用研究として円管内に直角三角形のボルテックスジェネレータ(以下V.G.と略記)を設置した場合の実験を行い,縦渦形成のようすとその挙動,持続性などについて調べてきた。その結果として,前報⁽⁵⁾では円管内に設置されたV.G.によって生成された縦渦が管内をらせん状に旋回すること,それに伴う局所熱伝達率分布の変化等について述べた。そのなかで伝熱促進効果は最大で滑面の1.9倍に達するのに対し,流動損失は極めて小さく,ポンプ動力一定の熱的性能比は1~1.2となり伝熱促進体として有望であることを示した。

しかしながら縦渦およびそれに誘起される流れの挙動と熱伝達促進効果との関係,縦渦に伴う流れの諸特性の変化が伝熱促進効果へどのように影響を及ぼすのかなどについての伝熱促進メカニズムの詳細は不明である。

そこで本研究は流れの可視化を行い,より詳細に縦渦の挙動を調べ,さらに壁面近傍の流れ場の諸特性を測定することで,縦渦の挙動に伴う流動特性と温度場

* 原稿受付 2001年1月22日。

^{*1} 正員,琉球大学工学部(〒903-0213 沖縄県西原町字千原1)。^{*2} 学生員,琉球大学大学院。

E-mail: senaha@tec.u-ryukyuu.ac.jp

の変化の関係およびその伝熱促進構造を明らかにすることを目的とした。

記 号

- C_p : 壁面圧力係数 $= (P_s - P_0) / (\rho U^2 / 2)$
- C_f : 管軸方向壁面摩擦係数 $= \tau_w / (\rho U^2 / 2)$
- D : 管内径
- h_r : 局所熱伝達率
- h_{mnx} : 周方向局所最大熱伝達率
- H : V.G. 翼高さ (= 管半径)
- L : V.G. 翼長さ (= $2H$)
- P_s, P_0 : 局所壁面静圧, 管路出口静圧 (= 大気圧)
- Re : レイノルズ数 $= U_0 \cdot D / \nu$
- U_0 : 円管入口平均速度
- U, u : 管軸方向 (X 方向) の平均速度および乱れ成分
- V, v : 壁面より鉛直上向き方向 (Y 方向) の平均速度および乱れ成分
- V, F : 速度変動を主流速度 U_0 で除した時間変化波形
- W, w : 円周方向 (Z 方向) の平均速度および乱れ成分
- X : 管軸方向 (流れ方向) 距離
- Y : 壁面より管中心へ向かっての距離
- Y_c : 渦中心位置高さ
- Z : 円周方向
- θ : 周方向角度
- ν : 流体の動粘性係数
- ρ : 流体の密度
- τ_w : 軸方向壁面局所せん断応力

2. 実験装置および実験方法

実験は流れ場および熱伝達測定用の2種類の円管流路を用いて行った。流れ場の実験装置は内径 $D=50$ mm で、長さが 50, 100, 150 mm の異なる黄銅製ユニットを複数個連結させた全長 1500 mm の円管流路である。その全体および測定機器の配置の概略を図1に

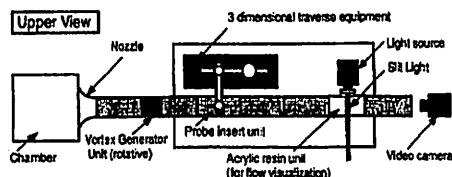


Fig. 1 Schematic diagram of test section and its arrangement

示す。作動流体は空気を用い、流れは円管上流に設けられたチャンバで整流された後にノズルを介し一様流速で流入する。

本実験では V.G. を単一で円管内に設置しており、その形状および V.G. 設置ユニットの概略を図2に示す。V.G. は前報⁽³⁾と同様に翼長さ $H=25$ mm ($H=D/2$)、長さ $L=50$ mm の直角三角形形状で、流れに対して迎え角 20° に設置した。座標は V.G. 翼後端を管軸方向距離 $X=0$ mm とし、鉛直方向は円管壁面を基準とし管中心方向に Y 軸をとる。 Z 方向は X, Y と直交し、縦渦および旋回流の回転の向きを正とする向きとした。なお簡易的に局所における Z 方向と円周方向とは同義として扱うこととする。またそれぞれの方向における時間平均速度成分を U, V, W 、乱れ成分を u, v, w とした。V.G. に対する周方向角度 θ も縦渦、旋回流の向きを考慮し、下流方向から V.G. を見て反時計回りの向きを正方向とした。

管軸方向速度成分 U の測定は外径 $\phi 0.6$ mm のピトー全圧管を、壁面近傍の3方向速度成分測定にはプローブ外径 $\phi 3.0$ mm で受感部直径 $5 \mu\text{m}$ のタングステン線を主流に対し 45° に傾けた単一傾斜熱線プローブを用いた⁽⁶⁾。壁面摩擦係数 C_f はプレストン管を用いて管軸方向壁面せん断応力 τ_w を求め、それを $\rho U^2 / 2$ で除して算出した。なお V.G. 設置ユニットを測定部の円管に対して独立に回転させることで V.G. に対する周方向角度 θ における分布を相対的に測定した。また図1中に示すアクリル製の円管ユニットにスリット光を照射し、煙トレーサにより流れを可視化した。さらに縦渦の生成過程および構造のより詳細な観察を行うため別に作った透明アクリルの測定円管をサブマージさせた water table を用いて染料を流した可視化実験も行った。

局所熱伝達率の測定は内径 30 mm のペークライト製円管内壁に厚さ 30 μm のステンレスはくを接着し、

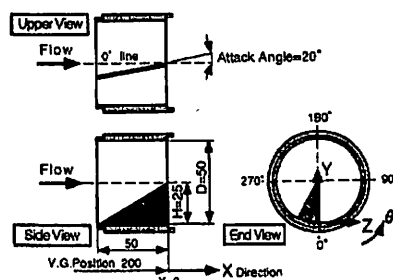


Fig. 2 Unit of the vortex generator insert and dimensions

それに直流電源により通電加熱した熱流体一定の伝熱場とし、 $Re=19\ 800\sim 64\ 400$ の範囲で測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 縦渦の発生および挙動の可視化 縦渦の発生およびその挙動と熱伝達率分布の変化を併せて伝熱現象を考えることは重要である。そこでV.G.近傍および下流域の流れの可視化を行い、その結果と局所熱伝達率分布の変化を比較検討する。

V.G.近傍のより詳細な流れ挙動を観察するため、作動流体に水を用い、V.G.上流よりフルオレセイン、ローダミンBの2種類の蛍光染料を流入させ可視化した。その結果と流れの様式図を図3(a)、(b)に示す。

主縦渦の生成はV.G.先端部に流入した染料が、つる巻状にねじり込みながら発達し、V.G.直後で渦心部に逆流領域をもつ縦渦中心となり、その周りを取り囲むようにより大きな渦が生ずることにより形成される。また主縦渦は外周部に比べて中心部の速度成分が小さいため、その外周部において中心部へ巻き込む一種のせん断渦であるドーナツ状の渦輪を形成する。可視化写真で縦渦外周部において中心部へ巻き込む複数個の渦輪が見られ、 $X/D=3$ 近傍で渦輪が管壁にぶつかるように接し始める。この渦輪の衝突過程が後述する局所熱伝達の促進に大きく寄与する。さらにV.G.直後の流れ場は主縦渦の生成に加えて、V.G.下部よ

り一種の首飾り渦であるコーナ渦が複数個生成する。以上のような縦渦生成のようす、特に主縦渦の生成および縦渦外周部の渦輪をスケッチしたようすを様式図に示してある。

次に本実験における伝熱促進対象域である $Re=10^4$ 以上の高レイノルズ数・乱流場における縦渦の移行現象および渦輪の生成について調べた結果を示す。

図4(a)~(d)に煙トレーサを用いて縦渦の移行現象を可視化した例として $Re=62\ 400$ での $X/D=1, 3, 9, 21$ における下流方向から撮影した断面写真を示す。写真上で煙トレーサにより白く写っている場に縦渦が

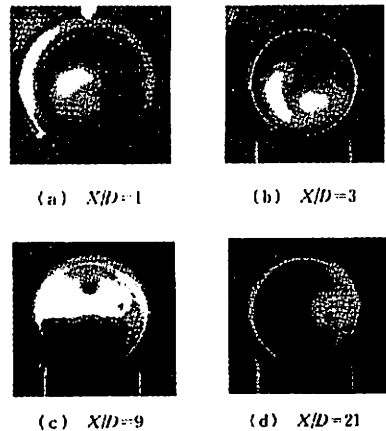
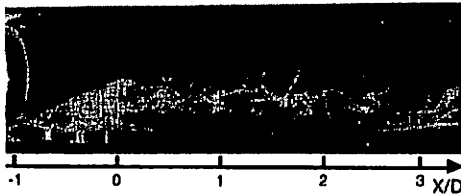
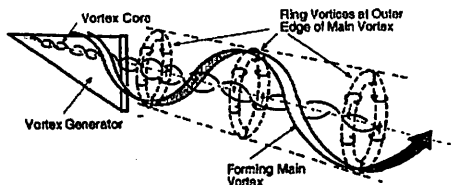


Fig. 4 Flow pattern of longitudinal vortex visualized by smook

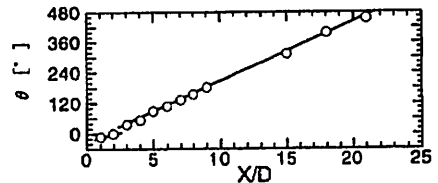


(a) Visualized flow pattern of main vortex including rolled up ring vortices in outer edge ($Re=4\ 800$)

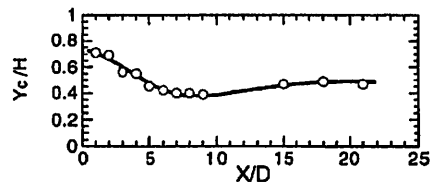


(b) A sketch of forming the main vortex, corner vortex and ring vortices at outer edge of the main vortex

Fig. 3 Visualization and sketch of flow motion downstream and just behind vortex generator



(a) Change of the vortex core position with downstream direction



(b) Change of the vortex core height with downstream direction

Fig. 5 Positions of vortex by video observed smoke behavior

存在する。

まず図4(a)に示す V.G.の直後の $X/D=1$ の場合は反時計方向(流れ方向に右ねじの進む方向)に強く回転する主渦の存在が確認される。この場合も蛍光染料による可視化と同様に主縦渦はまだ壁面へは直接は接していない。

次に $X/D=3$ の場合を図4(b)に示す。 $X/D=1$ の場合と比べて外形が発達した縦渦が周方向に沿って移動し、壁面に近接しているようすが確認される。縦渦は壁面に接近後、この位置より下流で安定した旋回挙動を始める。さらに下流域にあたる図4(c) $X/D=9$ および図4(d) $X/D=21$ では U 速度成分が小さいため主渦中心が薄く黒く写っており、渦の移動のようすが比較的容易にわかる。渦中心はそれぞれ $\theta=180^\circ$, $\theta=80^\circ(=440^\circ)$ 近辺へ移動しており、これら一連の写真より主縦渦が円管内をらせん状に旋回し、十分下流まで流れるようすが確認される。

この縦渦の移動のようすを撮影したビデオ動画像を注意深く観察することで、渦中心の周方向位置の変化および壁面からの高さの変化を求めた結果を図5(a), (b)に示す。なお縦渦中心部角度は円管中心と渦中心を結んだ垂線が壁面に至る位置の周方向角度 θ とした。

まず図5(a)の渦中心の周方向への変化だが、縦渦は V.G.の背面側で発生し、 $X/D=2$ 近傍まで緩やかに移動、 $X/D=3$ 近傍で壁面へ再附着する。その後は、管軸に対して約 11° の一定の傾きで旋回移動していく。なお傾きは実寸法での管軸方向距離 X に対して

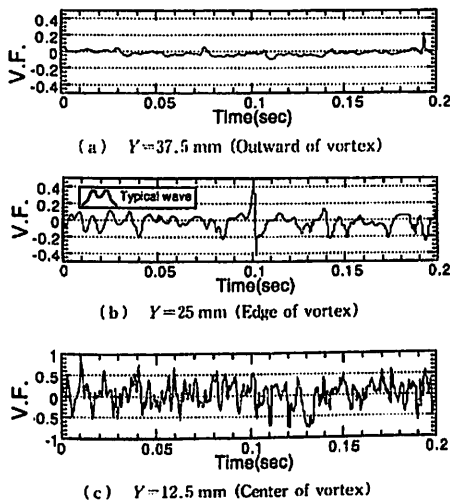


Fig. 6 Wave of velocity fluctuation (V.F.)

円周に沿って移動した距離から算出した。この旋回現象を平板上に縦渦を導入した場合の Wandering による移行現象⁽⁷⁾と比べると、本実験における周方向(平板上の場合スパン方向に相当する)への移動距離は平板の場合の4~7倍以上と極めて大きく、これは旋回流の干渉を受けた円管内特有の現象である。

次に壁面からの渦中心高さ Y_c を V.G. 翼高さ H で除した比 Y_c/H の変化を図5(b)に示す。渦中心高さは渦生成直後 $X/D=1$ で $Y_c/H=0.7$ をとり、その後減少し $X/D=6\sim 9$ で $Y_c/H=0.4$ と最も壁面に接した後、 $X/D=10$ 以降でわずかに大きくなり下流へと推移していく。渦中心高さの極小値についても平板上の場合と比較すると、例えば V.G.形状 ($L/H=2$, 迎え角 18°) がほぼ等しい志沢らの場合⁽⁹⁾ では $Y_c/H=0.6$ 程度である。このことは円管内の場合には旋回流により発生した遠心力により縦渦を壁面近傍へ押しつけているものと考えられる。

次に $Re=10^4$ 以上でのリング状せん断渦である渦輪発生について調べるため、縦渦が壁面衝突直後である $X/D=4$, $\theta=0^\circ$ の位置で壁面から 37.5, 25, 12.5 mm の位置において I 形熱線プローブを挿入し速度変動の波形を測定した。測定位置はそれぞれ縦渦外縁から外側位置、縦渦外周部(渦輪)および縦渦のほぼ中心部位置に対応する。その結果として図6(a)~

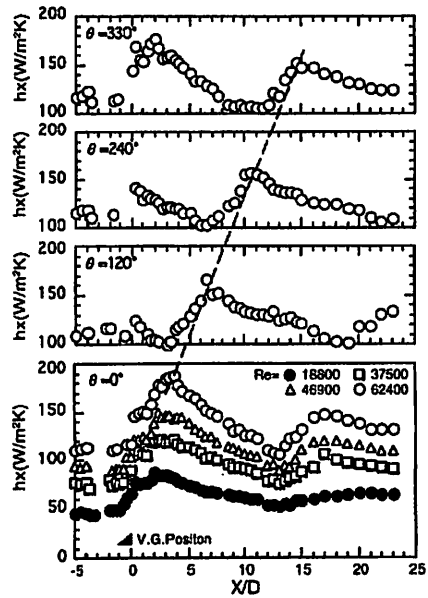


Fig. 7 Variations of local heat transfer coefficients with velocity, and streamwise change of its profiles

(c)に $Re=10^4$ での速度変動を主流速度で除した値の時間変化波形 $V.F.$ を示す。

図 6(a) に示す縦渦外縁より外側では乱れは非常に小さく、これは $V.G.$ 上流の乱れとほぼ同程度であり縦渦の影響をほとんど受けていない。次に図 6(b) に示す縦渦外縁部では、二つのピークをもつ特徴的な波形が現れているものと思われる。図 6(b) 中にその基本波形の概略を示す。この二つのピークをもつ波形の発生状態は必ずしも安定したものではなく、ピーク値、振幅、ピーク形状など、高周波の乱れが付与されたと思われる複雑な波形となっているものの、波形データの観測を通して約 45 Hz 程度おきにはほぼ周期的に生じているものと判断した。これは、渦輪が熱線を通過することで生ずるものと考えられる。図 6(c) に示す縦渦内部の波形は上記 2 点と比べて変動が非常に大きく、縦渦中心部が逆流成分を有する非常に乱れた領域であることによる。

3.2 流れ方向局所熱伝達率の変化 管内局所熱伝達分布の変化について上述の可視化結果と併せて考える。設置基準位置である $\theta=0^\circ$ 上での局所熱伝達率 h_r 分布の Re による変化および $Re=62400$ 一定条件での代表的な周方向角度における変化をまとめたものを図 7 に示す。

h_r はいずれの Re に対しても $X/D=3$ 近傍で極大値をとった後減少に転じ、極小、再び極大を繰返す周期的な分布をとる。この最初の極大値をとる位置は可視化において $\theta=0^\circ$ ライン上で主渦が壁面と衝突する位置にほぼ合致している。また縦渦のらせん旋回による h_r 分布の周方向の変化についても、 h_r の極小・極大値が流れ方向に一定の割合で移行していくようすが確認されよう。しかし、この場合の極大値移行の傾きは管軸に対して約 14° で、上述した縦渦中心の移動の傾きとは一致していない。このことについては極大値の発生要因の変化として図 12 の説明において述べ

る。

3.3 壁面近傍の流れ特性 縦渦による伝熱促進では、渦回転により流れが壁面へ吹き下ろす領域において高い熱伝達を得るとされているものの、壁面近傍の速度こう配および乱れ強さ等がどのように伝熱促進に影響するかについては必ずしも明確にされていない。そこで縦渦が壁面に接した直後で縦渦の壁面へ及ぼす影響が最も強いと思われる $X/D=4.0$ と十分下流域である $X/D=21.3$ について $Re=62400$ の場合を例にとり、流れ場の概要、熱伝達率分布、平均速度成分、乱れ成分の分布を比較し、その伝熱促進メカニズムを考える。

まず同位置における流れ場の概要として図 8(a)、(b) に流れ方向速度成分を管内平均速度で除した U/U_0 による等速度線図を示す。なお半径方向距離を中心から $D/10$ 間隔の破線で記しておく。図 8(a) に示す $X/D=4.0$ の場合だが、渦中心部ほど U/U_0 は小さい分布となっており、縦渦中心は $\theta=30^\circ$ 、 $Y/H=0.6$ に存在する。縦渦の存在する管壁側 $\theta=270\sim 70^\circ$ の壁面近傍において等速度線の間隔が詰まった場、すなわち速度こう配が急な場が存在する。また $\theta=90^\circ$ 壁面上において渦の吹上がりの影響により境界層が厚く発達した分布が見られる。

図 8(b) に示す $X/D=21.3$ の場合では縦渦は管内を一回転し、その中心は $\theta=90^\circ$ 、 $Y/H=0.4$ 近傍に存在する。 $X/D=4.0$ の場合に比べて縦渦形状は明確ではないものの、吹上がりの影響は $\theta=120\sim 160^\circ$ 間の壁面上で顕著に現れる。また壁面近傍の速度こう配も全体的に緩やかになっている。

次に同位置における周方向熱伝達分布および壁面近傍流れの変化をそれぞれ図 9、10 に示す。なお伝熱促進効果に与える流れの影響の検討を容易にするため、周方向熱伝達率 h_r を同距離における周方向最大熱伝達率 h_{max} で除した h_r/h_{max} で表し、流れの変化につい

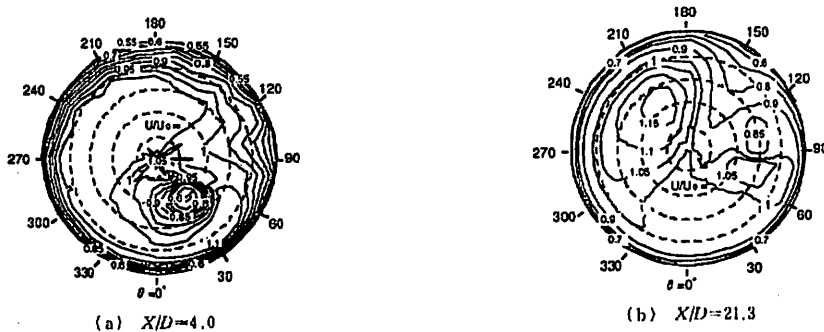


Fig. 8 Contours of iso-velocity ratio of streamwise velocity to mean velocity of duct

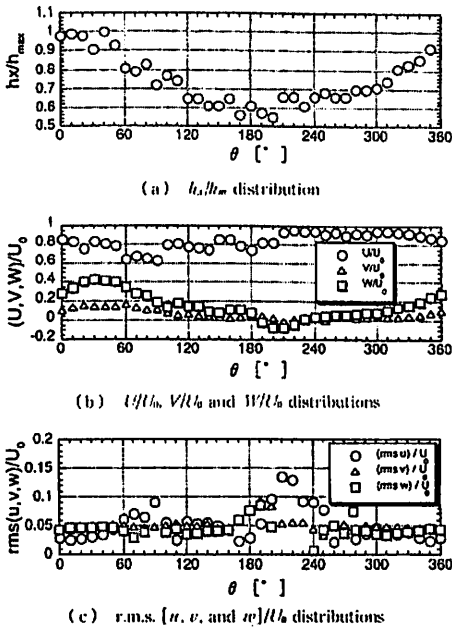


Fig. 9 Circumferential variations of heat transfer, mean velocity, and rms value of velocity fluctuation ($X/D=4.0$)

ては壁近傍 $Y=1.9$ mm の箇所で 3 方向平均速度成分および乱れ成分の rms 値を主流速度 U_0 で除した速度比、乱れ強さを求めた。

まず $X/D=4.0$ の h_x/h_m および流れ特性図を図 9(a)~(c) に示す。上述した等速度線図を参照すると図 9(a) に示す h_x/h_m は縦渦回転により流体が壁面へ吹き下ろす影響を受け始める $\theta=300^\circ$ 近傍から、流体が壁面から吹き上がる $\theta=120^\circ$ 近傍までが促進効果が高くなることわかる。また周方向熱伝達率の $\theta=30\sim 120^\circ$ 間で小さな極小・極大を伴う乱れた分布は V. G. 直後のコーナ渦によるもので、本実験の場合にも棚原らの報告⁽¹⁰⁾と同様にその影響を受ける。

図 9(b) に流れの 3 方向平均速度成分を示す。ここで最も速度成分比が大きい U/U_0 は、その分布と h_x/h_m の増加傾向に直接的な対応関係が見られない、一方、旋回方向速度成分比 W/U_0 の増加傾向については h_x/h_m の分布によく対応している。鉛直方向成分比 V/U_0 は $\theta=0\sim 90^\circ$ では壁面に対して比較的強い上向き成分が現れており、これは境界層を厚くする効果を与えるもので熱伝達率を低下させる。ここで $\theta=50^\circ$ において W/U_0 は極大値をもつものの h/h_m は極値を有しておらず、これは W 成分のみが熱伝達増加に一義的に効く因子でないことを示唆し、本実験の結

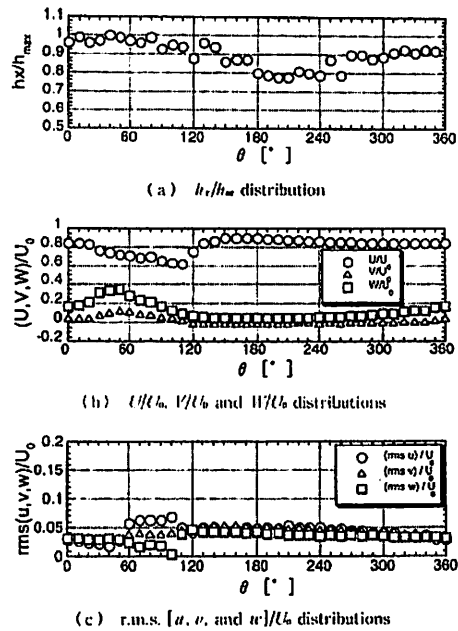


Fig. 10 Circumferential variations of heat transfer, mean velocity, and rms value of velocity fluctuation ($X/D=21.3$)

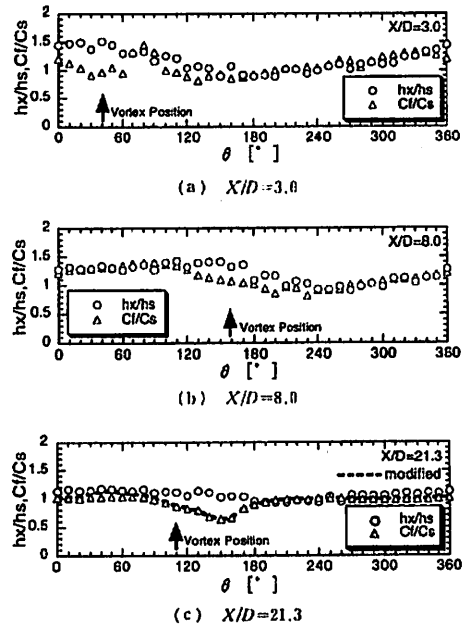


Fig. 11 Relation between heat transfer and shear stress on the wall surface

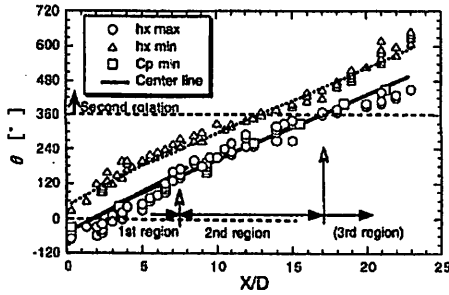


Fig. 12 Distribution of circumferential positions of center line of vortex, maximum, minimum heat transfer and minimum wall static pressure

果では例えば W 成分に鉛直方向成分 V の効果を加えた双方の効果から h_x/h_{max} 周方向分布形を成すと考えられる。

図9(c)には各成分の平均乱れ強さを示す。一般的に乱れ強さもまた熱伝達率を高める重要な因子であるが、本実験では h_x/h_{max} 分布形状との直接的な相関は見られない。ここで u の高 rms 値が $\theta=90^\circ$ や $\theta=210^\circ$ の場所に出現しているが h_x/h_{max} との相関はやはり見られない。またこの高 rms 値の発生機構だが、その位置にコーナ渦が存在することより発生するものと推測されるが詳細は不明である。

管内下流域 $X/D=21.3$ の h_x/h_{max} および流れ特性を図10(a)~(c)に示す。この場合も上流域 $X/D=4.0$ の場合と同様に、 h_x/h_{max} と W/U_0 の増加に強い相関が見られる。また一般に乱流促進体をおいた伝熱促進では、下流域において乱れの熱伝達促進への寄与する割合が比較的增加するとされるが、本実験では乱れ強さは $X/D=4.0$ の場合と同様に h_x/h_{max} との間に直接的な相関は見られず、乱れの熱伝達促進に対する影響は大きくないようである。

3.4 熱・運動量移動の相似性および縦渦による伝熱促進要因の変化 一般に乱流伝熱場において h_x 増大と壁面摩擦係数 C_f の増大には強い相似性がある⁽¹⁾。しかし縦渦のような大規模渦交換が起こる流れ場においては非相似性の発現の可能性があるが、もし C_f の増大を抑え h_x のみを増大せしめることができれば高効率の伝熱促進が達成される。そこで縦渦が壁面に接する位置、渦中心が壁面に最も接近する位置、十分下流位置の $X/D=3, 8, 21.3$ について、滑面流路に対する熱伝達率増加比 h_x/h_0 と管軸方向壁面摩擦係数増加比 C_f/C_0 を比較した結果を図11(a)~(c)に示し、これらの相似性について検討する。図11中に

は参考のため渦中心位置を示す矢印を付しておく。

$X/D=3, 8, 21.3$ いずれの場合でも全体的に h_x/h_0 および C_f/C_0 は、ほぼ合致した分布となっており相似性は保たれている。しかし壁面と渦の接点近くで局所的に h_x の増大が C_f を上回る領域が見られ、非相似性が発現しているように見られる。ここで対象としている渦中心直下の壁面近傍では、強い三次元性を有する流れ場となっており、本実験で用いたプレストン管による C_f の測定では、旋回方向の壁面摩擦応力の増大分が測定できないため、実際の局所 C_f 値より低い値を示していると考えられる。そのため C_f の旋回方向の増大分を見積もり、非相似現象が現れているかを検討する必要がある。

V. G. 下流壁面近傍の旋回成分 $(V^2 + W^2)^{1/2}$ は V. G. 形状、迎え角、V. G. からの距離、境界層の発達状態等の影響を受けて一概にその強さは決まらず、平板の場合⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾で V. G. 高さに対して下流域約 $X/H \leq 6$ (本実験の $X/D \leq 3$ に相当)で $0.2 \sim 0.6 l_0$ 、それ以降下流で $0.05 \sim 0.2 l_0$ 程度と異なる大きさをもつ。また V. G. 直下流域においては渦輪再付着に伴う壁面近傍の流れの揺動による非定常性の効果も加わること加味して時間平均 C_f の修正増大分を見積もるのはさらに困難となる。

そこで流れの状態が安定している十分下流域の $X/D=21.3$ の場合について、壁面よりやや上方の $X \cdot W$ 方向速度成分比が壁面まで単純に比例するものと仮定し C_f の旋回方向増大分の修正概算を行った。その結果を図11(c)中に破線で示す。本実験の場合では $X/D=21.3$ で W 成分は $0.35 U_0$ と大きな旋回成分を保持しており、比較的大きな修正効果が得られるものの、 $90 \sim 180^\circ$ 間で h_x/h_0 が C_f/C_0 より上回る有意差が残される。このような傾向は縦渦により流れが壁面から吹き上げる領域において顕著に現れており、これは黒田ら⁽¹²⁾が述べている壁面から鉛直上向き速度成分を与えた場において非相似性が現れる現象と一致するもので、 h_x の増減にかかわらず C_f を減らすような壁面摩擦抵抗減少コントロールの可能性としての一例を示唆するものである。

最後に縦渦の移行と局所熱伝達率の最大値 $h_{x,max}$ 、最小値 $h_{x,min}$ の位置および壁面静圧の最小値 $C_{p,min}$ の位置の関係を図12に示し、縦渦による伝熱促進要因について総合的に検討する。参考のため渦中心位置の変化を実線で表す。 $h_{x,max}$ と $C_{p,min}$ 分布、渦中心ラインを比較すると特に $X/D=7$ 以降において両者はよく一致する。これより上流を領域 I、 $X/D=7$ 以降を領域 II とおくと、 $h_{x,max}$ 、 $C_{p,min}$ は領域 I では渦中心より θ

が負側、すなわち縦渦により流体が壁面へ吹き下ろす側に現れている。この領域の縦渦はその外層に周期性を伴うリング状の一種のせん断渦を有し、この渦輪衝突による壁面上の非定常温度境界層の更新効果がおもな要因として考えられる。領域IIにおいて $h_{r,max}$ と $C_{p,min}$ 分布、渦中心ラインはほぼ一致しており、これは渦が壁に最も接する点、すなわち壁近傍の速度こう配が最大となる場所に対応する。この $h_{r,max}$ の発生要因の違いが、図7で述べた渦中心と $h_{r,max}$ の位置の管軸に対する傾きの違いにつながる。さらに本実験のように管内伝熱を扱う場合には管軸方向の壁面近傍速度・温度こう配がほぼ一定に達する発達領域を領域IIIとし、この領域では縦渦の旋回成分による流体混合の効果が相対的に高まることで $C_{p,min}$ 位置より θ が負側に $h_{r,max}$ はずれ始める。今後、縦渦を伝熱促進に利用する場合、このような特性を考慮した適用方法の検討が必要となろう。

4. 結 論

円管内流路に V. G. を設置した場合に発生する縦渦の流れ可視化、管内局所熱伝達率の増加、流れ方向速度分布、壁面近傍3方向平均速度、乱れ成分等を測定し、流れ場の変化と伝熱促進効果について調べた。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 流れの可視化より縦渦外周部に渦中心に向かって巻き込む渦輪が確認された。この渦輪が壁面上へ接する再付着点で最大熱伝達率を得る。
- (2) 壁面近傍の3方向速度成分比、乱れ強さを求

め伝熱促進効果と比較した結果、旋回成分 W が周方向 h_r 増加分布の傾向とよく対応することがわかった。

(3) 縦渦により流体が壁面から吹き上げる領域において熱伝達促進比 h_r/h_0 が壁面摩擦係数増加比 C_f/C_0 を上回る非相似性が現れる。

(4) V. G. 下流直後の領域における高い伝熱促進効果は、渦のはく離・再付着による壁面上の境界層の更新効果によるところが大きい。一方、それより下流の領域では縦渦による流体混合に伴う熱量交換の効果が相対的に高くなる。

文 献

- (1) Edwards, F. J. and Alker, C. J. R., *Proc. 5th Int. Heat Transf. Conf.*, (1974), 244-248.
- (2) Zhu, J. X., Mitra, N. K. and Fiebig, M., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 36-9 (1993), 2339-2347.
- (3) Biswas, G., Torii, K., Fujii, D. and Nishino, K., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 39-16 (1996), 3441-3451.
- (4) 親川兼男・瀬名波出, 機論, 65-629, B(1999), 289-295.
- (5) 瀬名波出・渡辺信二・親川兼男, 機論, 60-571, B(1994), 4152-4158.
- (6) 日本機械学会, 技術資料 流体計測法, (1985), 118-119.
- (7) Pauley, W. R. and Eaton, J. K., *AIAA*, 26-7 (1988), 816-823.
- (8) 9/月信介・木原貞一・大坂英雄, 機論, 63-605, B(1997), 94-100.
- (9) 志沢高明・Eaton, J. K., 機論, 59-565, B(1993), 2735-2741.
- (10) Yanagihara, J. I. and Torii, K., *JSME Int. J.*, Ser. II, 35-3 (1992), 400-405.
- (11) 中森好郎, 伝熱概論, (1975), 112-115, 資賢堂.
- (12) 黒田明彦・広瀬敬幸・工藤一彦, 機論, 99-1509, B(2000), 2413-2419.